



中国环境科学学会2016年学术年会

工业固废资源化产品生态设计

石靖靖 助理工程师

石垚 助理研究员

循环经济技术研究中心

中国科学院过程工程研究所

(2016.5 长沙)

内容提纲

(一) 研究背景

(二) 研究方法

(三) 案例分析

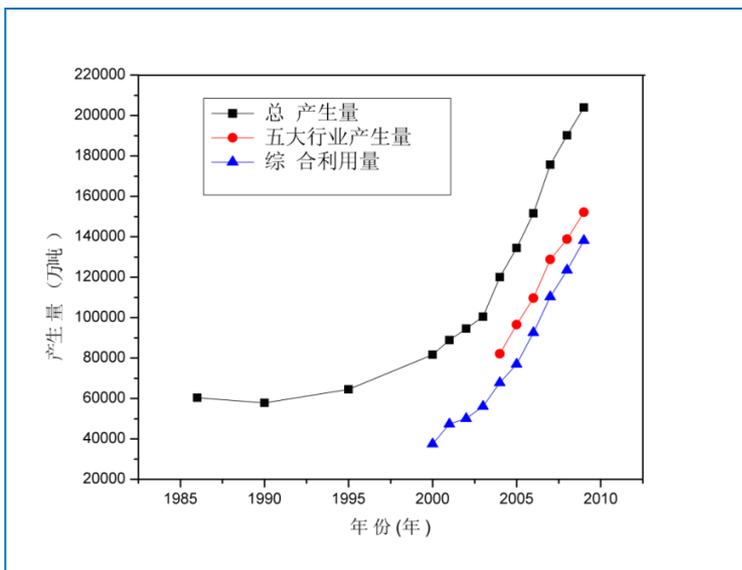
(四) 结论

一、研究背景

工业固废特点

□ 产生量大

- ✓ 我国工业固废**总产生量**：至2014年已达到32.6亿吨
- ✓ 我国粉煤灰、煤矸石、冶炼废渣、工业副产石膏、电石渣等大宗工业固废年产生量超过20亿吨，并持续增加。



我国工业固废总产生量以及综合利用情况

□ 危害严重

- ✓ 工业固废堆存占用大量土地
- ✓ 大量堆存的工业固废易导致地质灾害，威胁生命财产安全
- ✓ 含有毒害物质的工业固废污染土壤、水体、空气

粉煤灰资源化技术现状

应用领域	资源化技术
建材	生产水泥混凝土、制备烧结砖轻质板材、制备陶粒
农业	土壤改良、制肥
环保	废水处理、烟气脱硫
再生资源	合成沸石分子筛、提取空心玻璃微珠、金属提取、高铝粉煤灰冶炼硅铝合金、保温纤维板、造纸

山东德州晶华集团大坝有限公司

- 开发出325号、425号和525号粉煤灰系列水泥
- 年综合利用粉煤灰量170万吨

存在的问题:

- 1、高附加值、深度加工的技术不多
- 2、产品存在重金属扩散、有毒物质释放等环境风险

产品生态设计

□ 产品生态设计

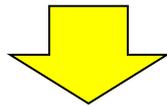
产品生态设计是指为提高产品生命周期内的环境绩效，优化产品的环境影响而将环境因素引入产品的设计和开发的活动的。

□ 研究进展

主要集中在家电、纺织品等终端产品的设计

《家用和类似用途电器生态设计通用要求》（GB/T 23109-2008）

《产品生态设计通则》（GB/T 24256-2009）



工业固废资源化方面

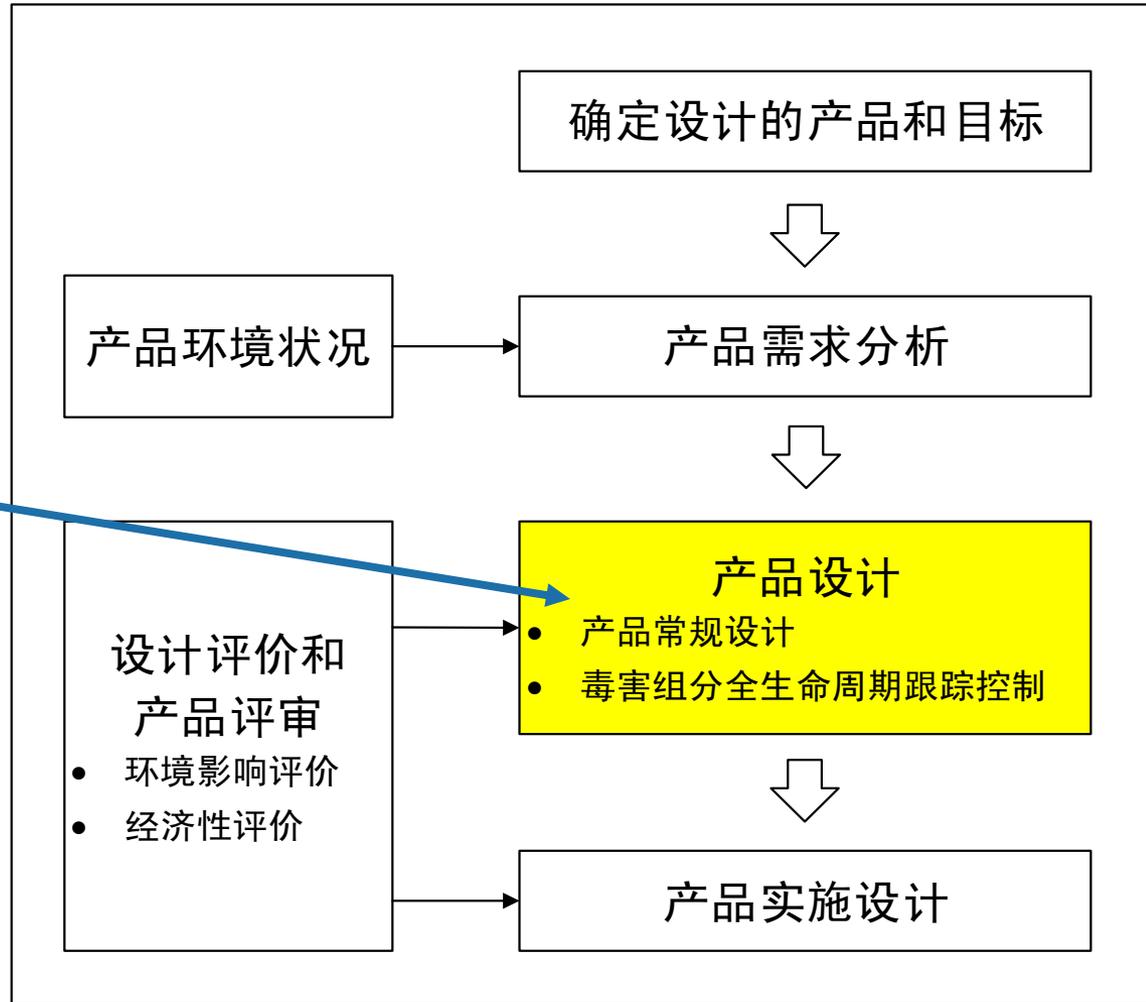
工业固废资源化生态设计：

- **走生态化利用之路，有效控制环境风险，防止二次污染**
- **提高工业固废生态设计技术，推广先进技术方案**

二、研究方法

固废资源化产品生态设计实施步骤

- 固废资源化产品生态设计的主要修改：
- ✓ 产品中毒害组分全生命周期跟踪控制；

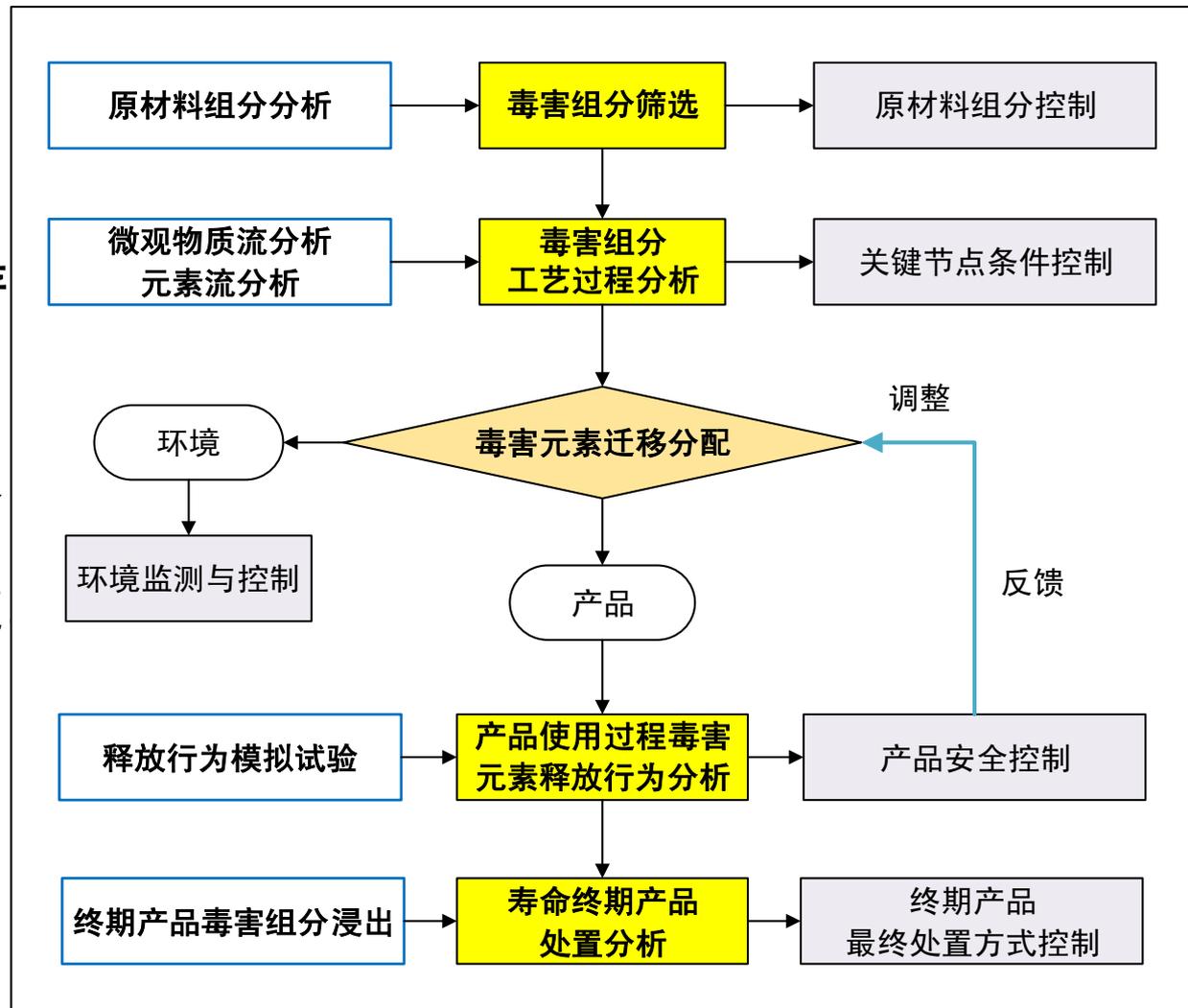


固废资源化产品生态设计实施步骤

毒害组分全生命周期跟踪控制方法

工业固废中毒害组分的存在:

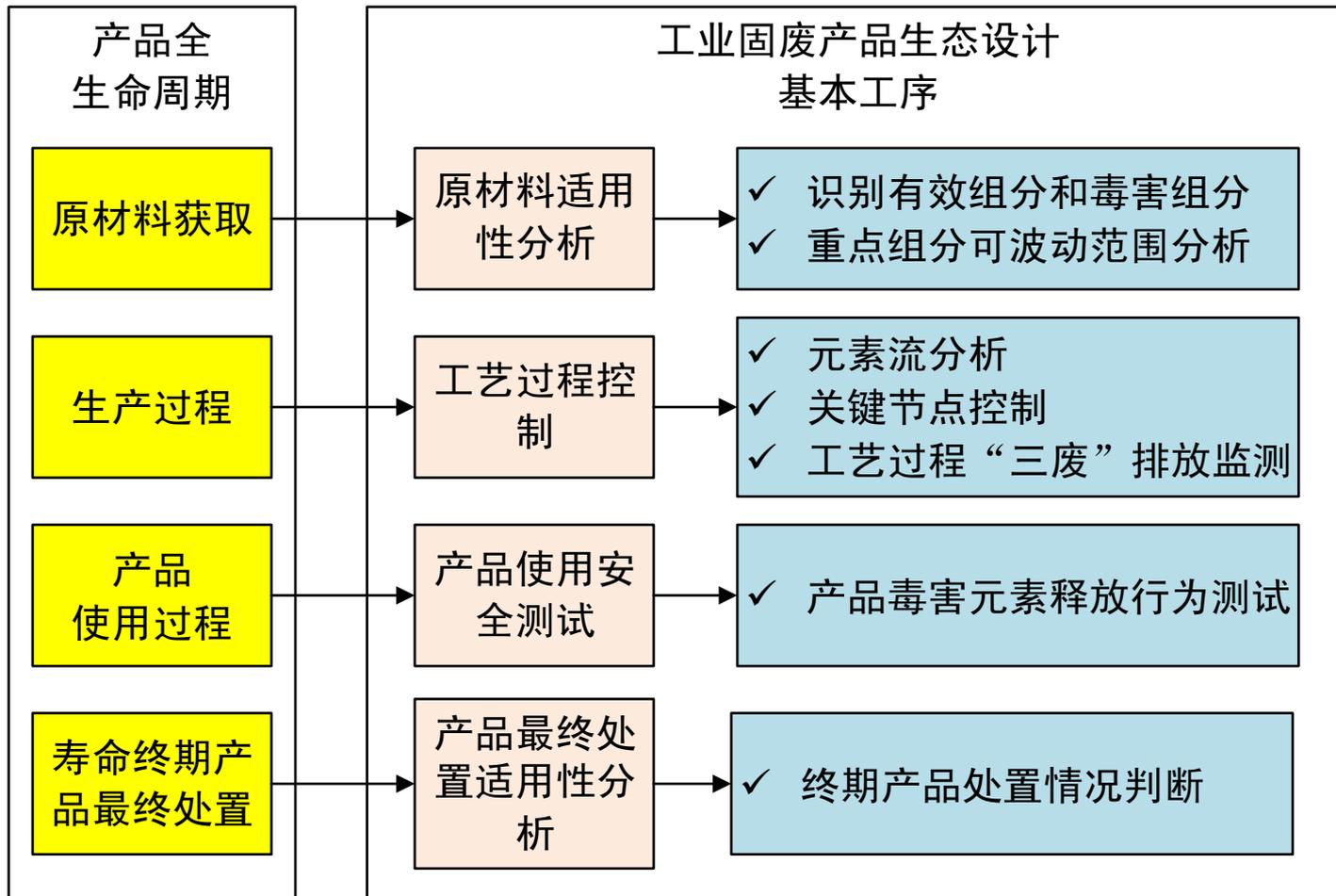
- ✓ 固废原料组分复杂多变;
- ✓ 工艺过程排放问题;
- ✓ 产品使用过程中环境安全问题;
- ✓ 产品最终处置的安全问题



毒害组分全生命周期监控方法

生态设计基本工序

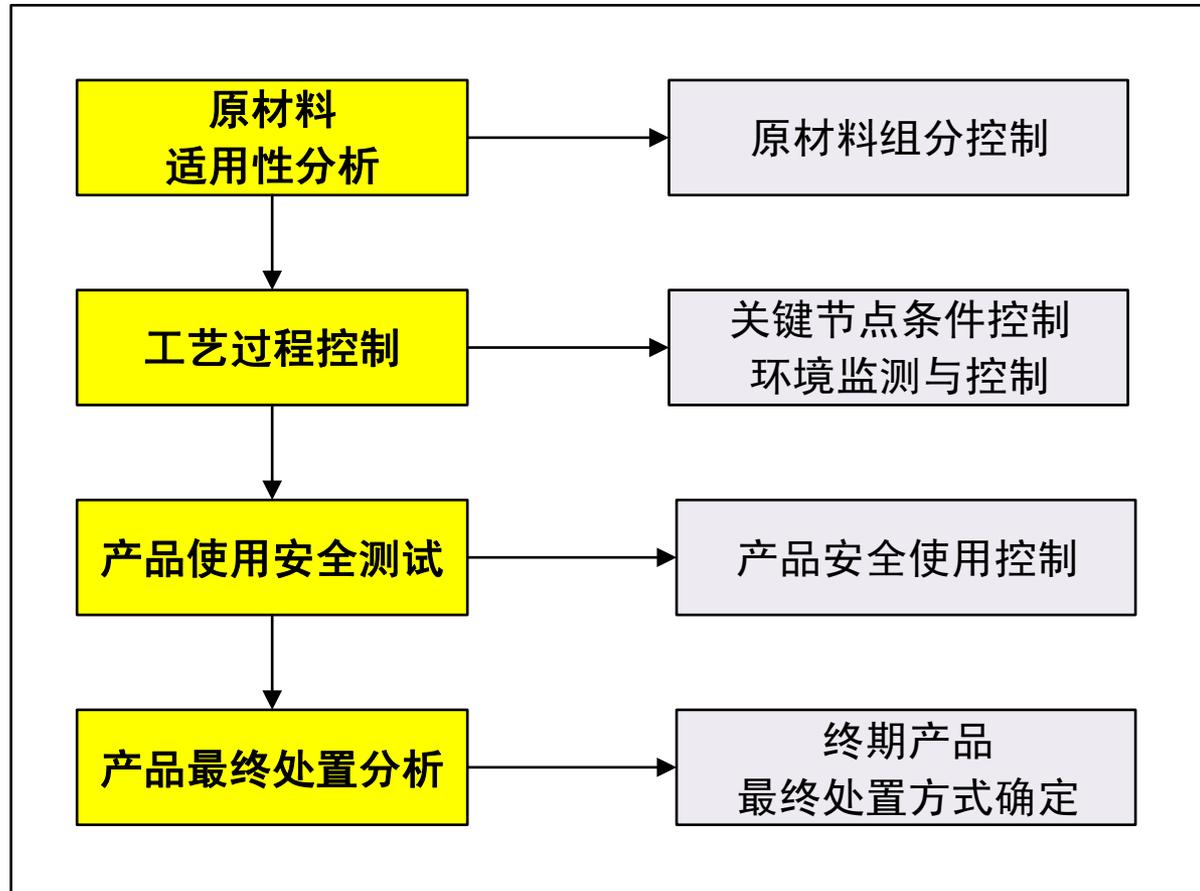
- 建立固废资源化产品生态设计的基本工序，主要包括了原材料适用性分析、工艺过程控制、产品使用安全测试和产品最终适用性分析四个步骤



工业产品生态生态设计工序

生态设计控制方案

□形成生态设计控制方案

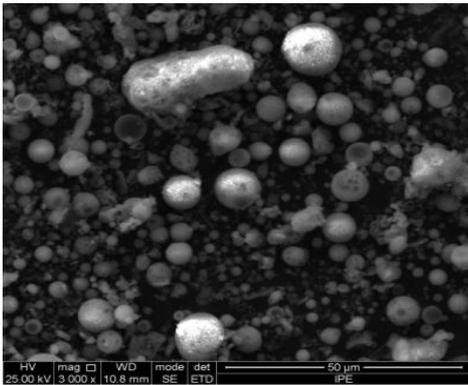


生态设计控制方案

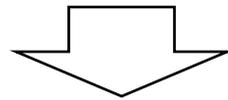
三、案例分析 粉煤灰生 产莫来石产品生态设计

粉煤灰生产莫来石

- ✓ 内蒙古鄂尔多斯地区的粉煤灰因其独特的高铝特点已成为研究的焦点。仅内蒙古中西部地区煤铝共生矿产资源总量超过500 亿t，可产生高铝粉煤灰达150 亿t。
- ✓ 目前我国莫来石生产厂家大多采用铝矾土、焦宝石或优质高岭土同工业氧化铝等为原料。



高铝粉煤灰中莫来石/刚玉/赤铁矿等多晶相共存

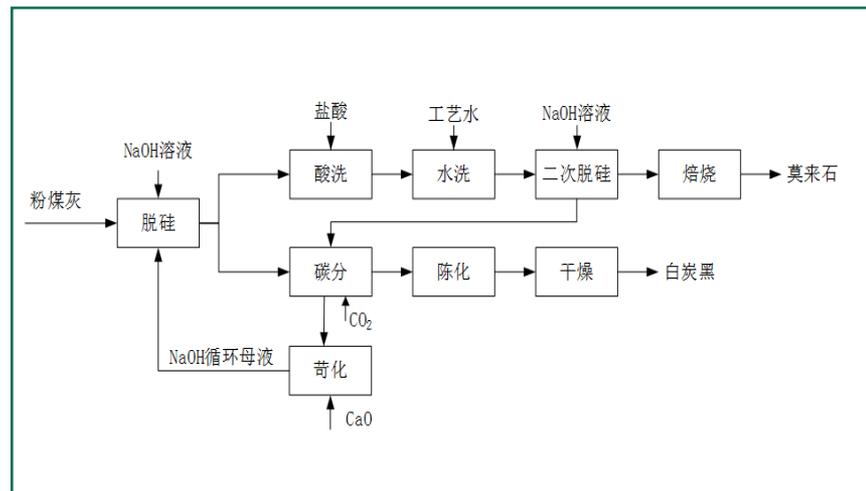


主要组成元素	Si、Al、Fe、Ca
少量元素	Mg、Ti、S、K、Na
微量元素	As、Pb、Cu、Cr、Cd等

利用高铝粉煤灰生产莫来石、白炭黑等铝硅系生态产品，是缓解资源短缺瓶颈、解决粉煤灰堆存问题的重要途径。

粉煤灰生态建材产品研发与方案设计

- ✓初步形成以高铝粉煤灰为原料生产高牌号莫来石和白炭黑的资源化技术
- ✓建立了稀碱预脱硅、活化剂杂质调控、深度脱硅、产物制备莫来石、脱硅滤液碳酸化制备白炭黑的整体工艺流程，使粉煤灰中的硅铝得以综合利用。



高铝粉煤灰制备莫来石联产白炭黑工艺流程图



多级逆流洗涤



脱硅液碳酸化法
制备白炭黑



莫来石



白炭黑

原材料适用性分析

高铝粉煤灰主要化学成分

百分 含量 (wt %)	主要化学成分										
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	MnO ₂
1	48.61	42.53	0.95	0.56	2.83	0.76	1.37	0.23	0.07	0.07	0.02
2	50.04	38.44	1.49	0.42	3.65	0.66	1.78	0.32	0.16	0.17	0.02
3	48.80	40.64	1.30	0.44	3.84	0.29	1.78	0.40	0.16	0.18	0.02
4	53.03	38.94	1.49	-	3.01	0.24	1.97	0.37	0.14	0.28	0.01
5	52.43	39.01	1.60	-	3.02	0.26	1.98	0.37	0.13	0.26	0.01

原材料适用性分析

□ 莫来石标准：《烧结莫来石》（YB-T 5267-2005）

产品等级	Al ₂ O ₃ (%)	TiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Na ₂ O+K ₂ O (%)
M70	68-73	≤3.5	≤0.5	≤0.4

□ 白炭黑标准：HG/T 3061-2009

产品	SiO ₂ (%)	TCu (mg/kg)	TMn (mg/kg)	TFe (mg/kg)
白炭黑	≥90	≤10	≤40	≤500

□ 粉煤灰中重金属含量

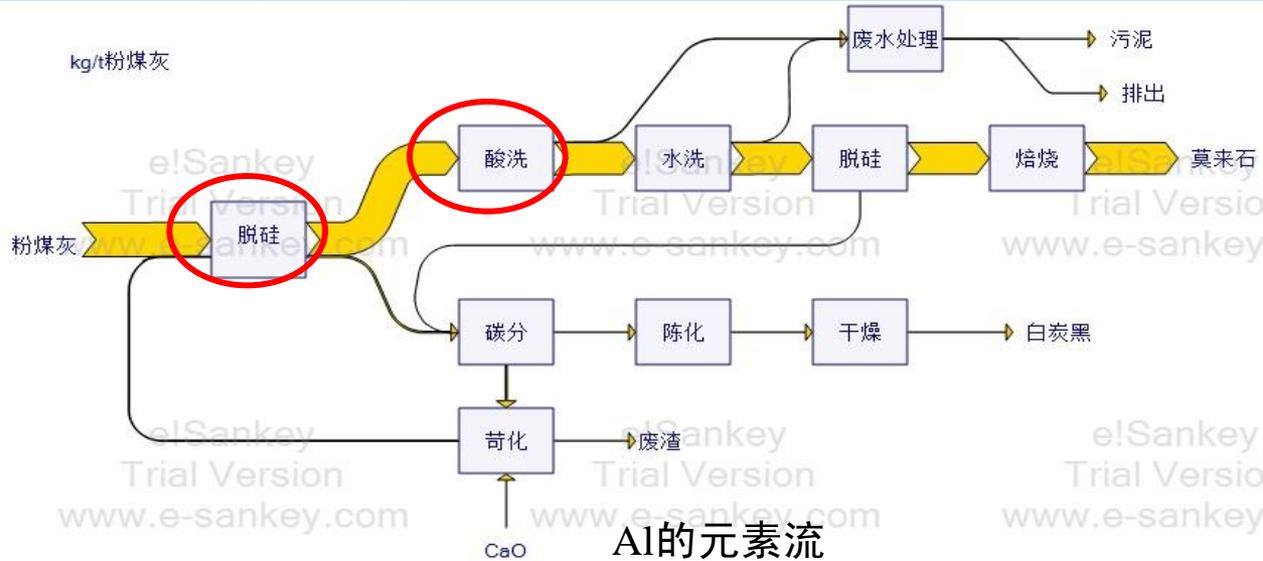
元素	As (ppm)	Cd (ppm)	Cr (ppm)	Cu (ppm)	Pb (ppm)
平均含量	24.31	1.68	90.4	36.31	80.26
阈值	28	5	66	88	51

有效组分：Al、Si

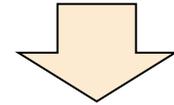
影响产品质量的毒害组分：Fe、Ti、Na、K、Cu、Mn

影响环境的毒害组分：Cr、Pb

工艺过程控制-节点控制

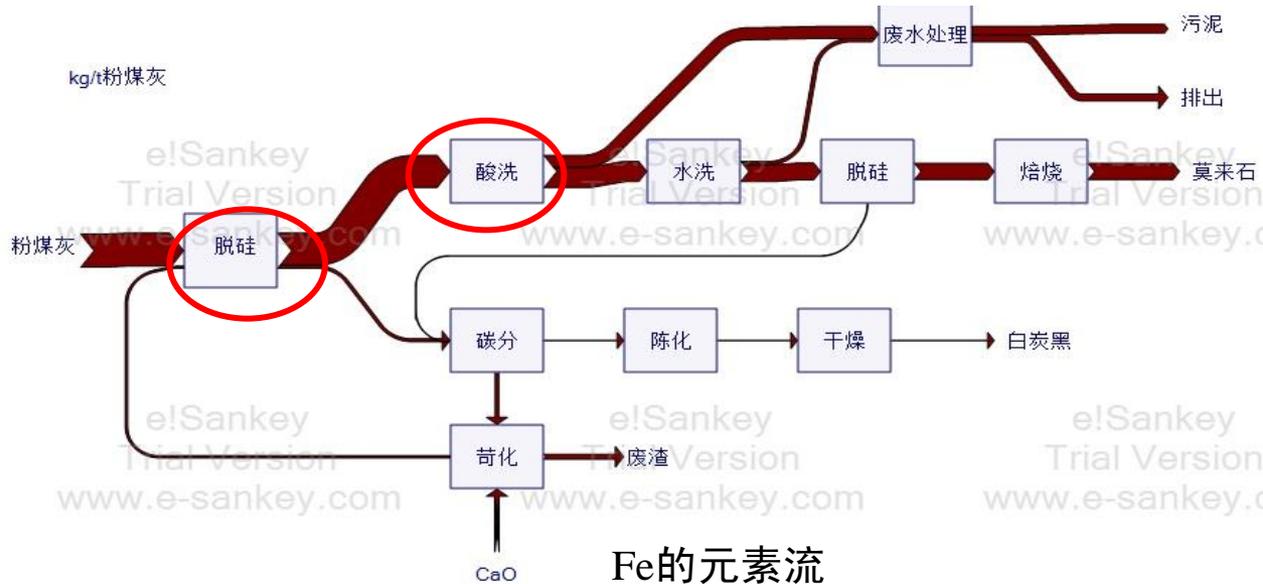


重点控制节点：
脱硅和酸洗

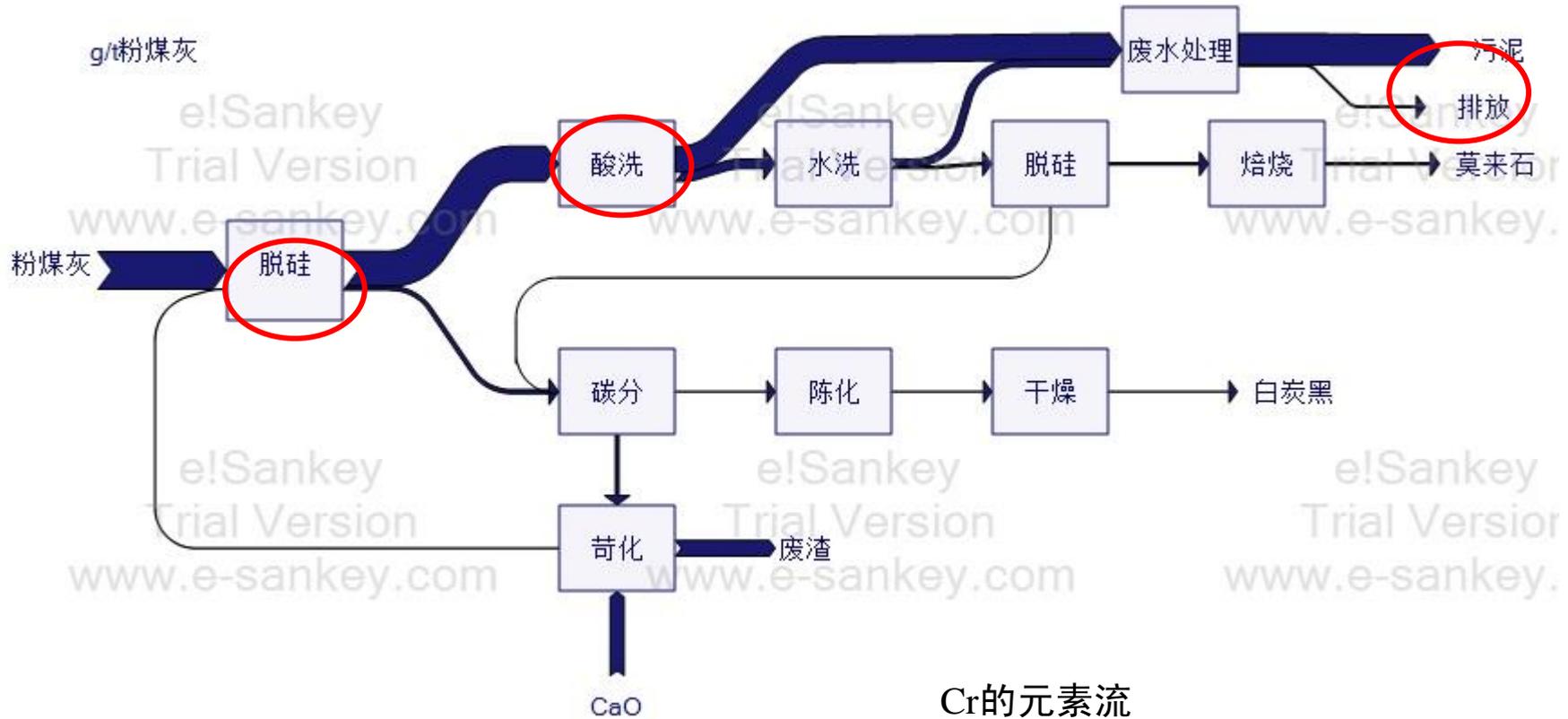


脱硅：NaOH浓度
反应温度

酸洗：HCl浓度
反应温度



工艺过程控制-“三废”排放控制



重点控制节点：脱硅和酸洗

“三废”排放控制：排出废水

产品使用安全测试

- ✓ 莫来石多用于生产硅莫砖、高铝砖、浇注料等功能建材产品，主要用于**砌筑高炉、热风炉、水泥窑口**等。
- ✓ 针对其用途和使用环境特点，设计**高温灼烧**实验，以模拟高炉、热风炉等高温环境，分析莫来石使用过程中**毒害组分的环境风险**。

具体监测项目	灼烧损失 (mg/kg)	标准 (mg/kg)
Cr	0.05	10
Pb	0.03	5

高温灼烧条件下，莫来石产品中挥发至大气的重金属量极低，初步认为可安全使用。

产品最终处置分析

- ✓ 莫来石砖或者莫来石型材的最终处置途径是作为**建筑垃圾填埋**。
- ✓ 针对最终处置途径和环境特点，设计**浸出实验**，模拟建筑垃圾在长期填埋中的环境风险。

项目	Cr (mg/L)	Pb (mg/L)
莫来石建材	0.021	0.007
危险废物填埋标准限值	12	5
生活饮用水标准限值	0.05	0.1

废弃莫来石建材中重金属的浸出浓度低于国家相关标准，初步认为可进行填埋处置。

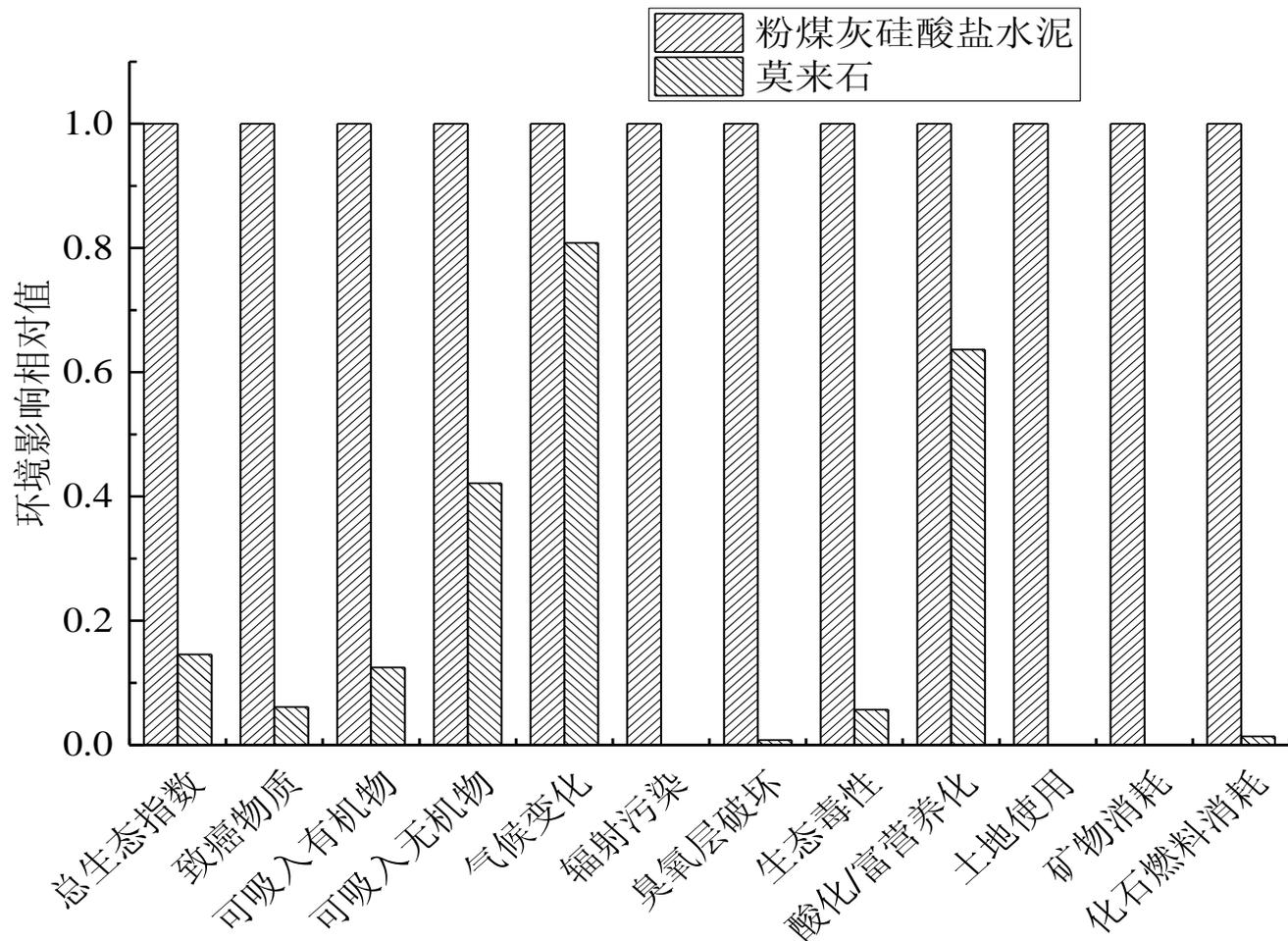
粉煤生产莫来石工艺控制要求

阶段	工序	控制指标	控制范围	参照标准
原料	粉煤灰调配	Al ₂ O ₃	48%~54%	《烧结莫来石》（YB-T 5267-2005）
		SiO ₂	38%~42%	
		毒害组分	0.5~2.0%	
工艺过程	脱硅	反应温度	90~95℃	
		NaOH浓度	200~220g/L	
	酸洗	反应温度	70~75℃	
		HCl浓度	100~150g/L	
	废水处理	Cr	<4.2g/tMullite	《污水综合排放标准》 （GB 8978-1996）
		Pb	<2.8g/tMullite	
产品	产品检验	Cr灼烧损失	<10mg/kg	
		Pb灼烧损失	<5mg/kg	
产品最终处置		Cr	<12mg/L	《固体废物 浸出毒性浸出方法 醋酸缓冲溶液法》 （HJ/T 300-2007）
		Pb	<5mg/L	
				《危险废物填埋污染控制标准》（GB18598-2001）

产品投入产出清单

	粉煤灰硅酸盐水泥		粉煤灰莫来石	
资源消耗	石灰石	3069	烧碱	190
	粘土	429	盐酸(31%v/v%)	506
	铁粉	90	二氧化碳	165
	石膏	165	氧化钙	211
	粉煤灰	1000	粉煤灰	1000
			水	2740
能源消耗	原煤	380	原煤	360
	电 (kWh)	92	电 (kWh)	82
产品	硅酸盐水泥	3300	莫来石	685
			白炭黑	205
大气污染物	CO ₂	1894	CO ₂	822
	NO _x	3.6	NO _x	0.17
	SO ₂	0.82	SO ₂	0.08
重金属	Pb (mg)	2.3	Pb (mg)	1.9
	Cu (mg)	1.8	Cr (mg)	2.7

莫来石产品生命周期评价



利用粉煤灰生产莫来石生态设计与生产水泥相比，莫来石的生态设计降低了资源对应的生命周期环境影响。

产品经济效益

产品经济效益	粉煤灰生产莫来石	粉煤灰生产水泥
投入成本（元/吨粉煤灰）	925	703
经营成本（元/吨粉煤灰）	1200	245
产品价格（元/吨粉煤灰）	2226	1000
效益（元/吨粉煤灰）	101	52

消耗单位粉煤灰，生产莫来石产品的效益更高

四、结论

结论

- 建立固废资源化产品生态设计方法。以粉煤灰生产莫来石工艺为例，通过原材料适用性分析、工艺过程控制、产品使用安全测试、产品最终处置适用性分析等步骤，提出了包含4个阶段、5个关键工序、13项控制要求的产品生态设计方案，并通过高温灼烧实验和浸出实验初步检验了产品使用及其最终处置的安全性。
- 初步实现工业固废资源化产品生态设计目标。但工业固废种类、固废资源化产品类型和用途繁多，特性差异极大，还应继续加强不同类型固废的技术开发和工艺设计，扩大固废资源化产品生态设计方法适用领域，推动工业固废资源化产品生态设计得到更广泛应用。

致谢

- 感谢国家863计划等项目的支持。
- 感谢大唐再生资源公司、东源煤铝公司等给予的大力支持。
- 感谢研究团队坚持不懈的努力和不断进取的科学精神。
- 感谢本届环境科学年会生态产业分会的组织方，请各位专家、参会代表提出宝贵意见。